

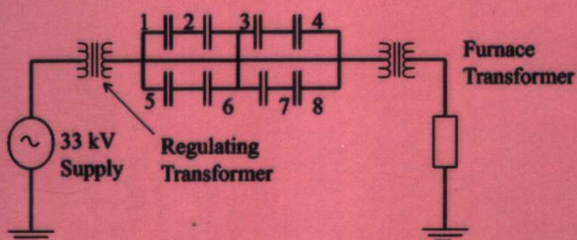


国际电气工程先进技术译丛

电力电容器

Power System Capacitors

(美) Ramasamy Natarajan 著
徐政 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国际电气工程先进技术译丛

电力电容器

Power System Capacitors

(美) Ramasamy Natarajan 著

徐政 译



机械工业出版社

本书对电力电容器的原理和应用进行了系统和全面的阐述,内容包括电力电容器的基本原理、电力电容器的主要应用场合、电力电容器的保护方法、电力电容器的维护、电力电容器应用对系统的影响,以及采用电力电容器进行功率因数校正的经济性分析等。书中包含大量的工程实例,可为解决实际工程问题作参考。本书适合于从事电力系统科研、规划、设计、运行的工程师与电力电容器设计、制造和应用的技术人员,以及高等学校电气工程及其自动化专业的师生阅读。

Copyright © 2005 by Taylor & Francis Group, LLC.

All Rights Reserved.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC.

本书中文简体字版由 CRC Press 授权机械工业出版社独家出版。

版权所有,侵权必究。

本书版权登记号:图字 01-2006-5826 号

图书在版编目 (CIP) 数据

电力电容器 / (美) 纳塔拉杨 (Natarajan, R.) 著; 徐政译. —北京: 机械工业出版社, 2007. 6

(国际电气工程先进技术译丛)

ISBN 978-7-111-21597-4

I. 电... II. ①纳... ②徐... III. 电力电容器 IV. TM531.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 081089 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 牛新国 责任编辑: 付承桂 版式设计: 霍永明

责任校对: 李秋荣 封面设计: 马精明 责任印制: 杨 曦

北京机工印刷厂印刷 (兴文装订厂装订)

2007 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 11 印张 · 425 千字

0 001—4 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-21597-4

定价: 40.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379768

封面无防伪标均为盗版

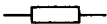
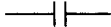
译 者 的 话

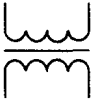
电力电容器是电力系统无功功率补偿（后面均简称无功补偿）装置的基本元件。随着我国电力工业的快速发展，无功支持和电压支撑已成为大电网安全稳定运行的决定性因素。尽管电力电容器提供的无功功率一般属于静态无功补偿的范畴，但通过合理的规划和恰当的运行调度，可以用电力电容器的静态无功功率来置换发电机的优质动态无功功率，即正常稳态运行时通过投入大量电力电容器来保持系统的电压水平，使电网中的发电机留有充足的动态无功功率储备，一旦系统发生故障，可通过调节发电机的动态无功功率来达到电压支撑的目的。由于电力电容器价格便宜，上述做法可以取得巨大的经济效益和社会效益。

虽然电力电容器应用非常广泛，但关于电力电容器的著作却十分稀少。正如本书作者在前言中所说：“从 20 世纪 50 年代起，在美国就电力电容器这个主题还没有出版过一本著作”；关于电力电容器的中文专著，就译者所见，仅有 1980 年中国电力出版社出版的《电力电容器安装运行和检修》一种（作者刘乾业）。

本书对电力电容器的方方面面进行了系统而全面的论述，在这一点上，本书可作为一本手册使用。如果读者希望对电力电容器的某个专题作更深入的研究，本书则提供了十分详尽的参考文献和相关标准的目录，可以起到一个极好的引导作用。

原书中一些明显的笔误或印刷错误，在翻译过程中已经改正但有些未加以说明。原书的部分符号不符合我国的使用习惯或国家标准，为保持与原书一致，翻译过程中没有加以改变。差别明显的符号列出如下：

项 目	原书采用的符号	国家标准符号
电阻		
电容		
熔断器		

变压器		
电压相量	$\bar{V}$ 或 V	$\dot{U}$
电流相量	$\bar{I}$ 或 I	i

本书的翻译得到了“十一五”国家科技支撑计划重大项目“特高压输变电系统开发与示范”课题 21 (2006BAA02121) 的资助。翻译过程中, 郑翔、任雷、徐蔚、郝全睿、段慧、李普民、吴海霞、卢冰、陈超、梁旭懿、李晓峰、徐武威等同学做了大量工作, 在此深表谢意。另外, 特别感谢我妻子封洲燕, 她对部分译稿进行了仔细的校读, 并提出了许多中肯的修改意见。

限于译者水平, 书中难免存在错误和不妥之处, 恳请广大读者批评指正。译者联系方式: 电话: 0571-87952074, 电子信箱: hnxuzheng@yahoo.com.cn。

徐 政

2007 年 3 月

于浙江大学求是园

原 书 序 言

在电气工程的各个领域，电力工程是最古老和传统的一个领域，但在现代技术中没有其他领域可以与电力工程相比，它在技术和工业结构两方面一直经历着持续不断的发展和演变。电力电容器在并联补偿和串联补偿两方面的应用充分展示了这个事实。自从交流电力系统被采用的最早期开始，电力工程师已经了解，在很多情况下，利用电力电容器来严格控制无功潮流和功率因数，对电网运行的高效和稳定电压非常必要。但那时功率因数补偿基于简单的经验法则，电力电容器容量的估算是粗略的，并在现场直接组装。今天，电容器工程是一个复杂的分析过程，可选择的电容器型号和技术非常广泛，甚至可以选择电子装置来模拟电容器的行为。

《电力电容器》一书结构组织合理，它对电容器及其在现代电力系统中应用的理论和实践进行了全面的描述和总结。从简单到深入的各个层面上，本书在理论、实践、术语和公式等方面都提供了一个扎实的基础，可以指导功率因数校正和电容器型号与容量的选择。将 Natarajan 博士的这本书作为日常的手册是合适的，但同时它也是一本优秀的自学教材。因为本书首先对基本原理进行了一次完整的回顾，然后在此基础上，全面阐述了关于电力电容器的现代理论与工程的各个方面，包括最新的分析与模拟技术。

与 Marcel Dekker 出版公司电力工程丛书中的任何一本书一样，《电力电容器》以实际应用为背景来描述现代技术，使得本书不但是一本有用的手册，而且还是一本很好的自学教材，同时也适合于高年级学生使用。本系列丛书涉及电力工程的所有领域，期望能为电力工程师提供应对 21 世纪电力工业挑战的知识和技能。

H. Lee Willis

原版电力工程丛书主编

美国

原 书 前 言

电力系统中，无功补偿是通过固定电容器、可投切电容器、变电站电容器组或静止无功补偿器在所有电压等级上就地实现的。不管是什么性质的补偿，电容器是所有补偿装置中最常用的元件。采用并联电容器来校正功率因数的方法已经应用了几十年。用于功率因数校正的电容器组包括熔断器、断路器、继电保护装置、避雷器和各种固定用部件。在过去的几十年中，技术上的进步非常巨大，这些进步以学术论文的形式被登载在各种杂志上，但从20世纪50年代起，在美国就电力电容器这个主题还没有出版过一本著作，本书正是在这个方向做出贡献。

电力系统中，并联电容器在功率因数校正方面十分重要，而串联电容器在改善长距离输电线路性能方面非常关键。本书的第1~9章讲述了电容器的基本原理，主要涉及功率因数校正，相关内容包括功率因数的概念、工业标准、电容器的规范、电容器的试验、并联电容器的安装地点、功率因数改善以及系统的效益等。第10~14章描述串联电容器、冲击波吸收电容器、应用于电动机的电容器、应用于其他场合的电容器和静止无功补偿。第15~18章讨论并联电容器的保护，包括并联电容器组的过电流保护、断路器和冲击保护。第19章阐述并联电容器组的维护。第20~23章探讨对系统的影响问题，包括谐波、操作冲击以及控制电缆上的感应电压。第24章讨论适用于功率因数校正的经济性分析。各章的排列遵循了从简单概念到复杂内容的次序。电容器装置的复杂性与保护和系统影响有关，读者应具有保护装置的基本知识，如熔断器、断路器、避雷器及不平衡保护装置等；同时，读者还应了解时域分析的基本概念，以便理解电容器投切操作的瞬态效应。应当指出，与瞬态相关的故障瞬间发生，而且有时在很远的地方发生。

本书立足于实际装置，以循序渐进、便于理解的方式描述了基本原理、电容器应用、保护及系统影响等专题。由于电容器故障与设备电压额定值和电力系统暂态有关，且即使能得到时域测量数据也难以确定故障的原因，因此本书的内容也许看起来很复杂。我曾经在企业电力系统和公用电力系统从事系统研究多年，我希望本书能为企业电力系统、公用电力系统以及电力咨询领域的电力工程师提供一个有用的工具，同时也希望能为从事实际电力系统评估的专业人员提供有用的帮助。我努力将本书内容表述清楚，以至于本书占用了我所有的业余时间，我对本书的内容，包括因疏忽所致的错误负责。

我要感谢软件供应商允许在本书中使用其版权材料，包括来自加拿大 British Columbia 大学 H. W. Dommel 博士的 EMTP 程序，来自美国田纳西州 Electrotek Concepts 公司的 SuperHarm 程序和 TOP 程序。感谢多家出版社和组织（如 IEEE）允许使用其材料。John Jenkin 提供了来自闪电博物馆的莱顿瓶照片，在此表示感谢。

我还要感谢如下组织提供与电容器装置相关的各种设备的照片。它们是：

Aerovox Division, PPC, New Bedford, Massachusetts, 美国；

Alpes Technologies Capacitors, Annecy - Le - Vieux, 法国；

B&K Precision, Melrose, California, 美国；

Capacitor Industries Inc., Chicago, Illinois, 美国；

Capacitor Technologies, Victoria, 澳大利亚；

Duke Energy, Charlotte, North Carolina, 美国；

FLIR Systems, North Billerica, Massachusetts, 美国；

Gilbert Electrical Systems and Products, Beckley, West Virginia, 美国；

High Energy Corporation, Parkesburg, Pennsylvania, 美国；

Maxwell Technologies, San Diego, California, 美国；

Maysteel LLC, Menomonee Falls, Wisconsin, 美国；

Mitsubishi Electric Products Inc., Warrendale, Pennsylvania, 美国；

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Washington, D. C., 美国；

Ohio Brass (Hubbell Power Systems), Aiken, South Carolina, 美国；

Toshiba Power Systems & Services, Sydney, 澳大利亚。

最后，我要感谢在过去多年中对本书所述学术问题进行过探讨的很多工程师。感谢审稿人的贡献，他们审读了本书的手稿并作出了宝贵的评论。感谢 Taylor & Francis 出版公司的 Nora Konopka、Christine Andreasen 和 Preethi Cholmondeley 协调本书的编辑工作，感谢 Keyword 出版公司的 Dan Collacott 所做的工作。

我还要感谢 KEMA 输配电咨询公司电力系统和资产管理部副总裁 H. Lee Willis 在本书项目和其他电力系统项目上所给予的帮助，同时感谢他作为 Marcel Dekker 出版社电力工程丛书的编辑对电力系统领域所做出的贡献。

Ramasamy Natarajan

目 录

译者的话

原书序言

原书前言

名词和术语的定义 1

第1章 引言 7

1.1 电容器的历史 7

1.2 用于电力工业的电容器 9

1.3 本书的结构 11

1.4 问题 14

1.5 参考文献 15

第2章 电容器的基本原理 16

2.1 平行板电容器和球形电容器的电容值 16

2.2 圆柱形电容器 19

2.3 电容的储能 20

2.4 电容器的充电和放电 21

2.5 问题 24

2.6 参考文献 24

第3章 功率因数的概念 25

3.1 功率因数 25

3.2 同步调相机 29

3.3 问题 31

3.4 参考文献 31

第4章 工业标准 32

4.1 制定标准的机构 32

4.2 与电容器相关的标准 34

4.3 结论 37

4.4 参考文献 37

第5章 电容器的技术规范	40
5.1 电容器单元的类型	40
5.2 电容器的技术规范	43
5.3 其他类型的电容器	51
5.4 问题	53
5.5 参考文献	54
第6章 电容器试验	55
6.1 设计试验	55
6.2 常规试验	57
6.3 安装试验或现场试验	59
6.4 问题	61
6.5 参考文献	61
第7章 并联电容器的安装位置	62
7.1 引言	62
7.2 确定电容器安装位置时应考虑的因素	63
7.3 关于变电站电容器的考虑因素	70
7.4 并联电容器组结构	73
7.5 用于电力电容器的电缆	76
7.6 问题	78
7.7 参考文献	78
第8章 改善功率因数	80
8.1 引言	80
8.2 固定电容器与可投切电容器	81
8.3 固定电容器和可投切电容器的应用	88
8.4 问题	89
8.5 参考文献	89
第9章 系统效益	90
9.1 引言	90
9.2 无功功率支持	90
9.3 改善电压沿线分布特性	91
9.4 降低线路和变压器的损耗	94
9.5 释放电力系统的容量	97
9.6 结论	98
9.7 问题	98

9.8 参考文献	98
第10章 串联电容器	99
10.1 引言	99
10.2 放射式馈电线上的串联电容器	100
10.3 输电线上的串联电容器	105
10.4 串联电容器应用的限制条件	106
10.5 串联电容器的其他应用	111
10.6 结论	114
10.7 问题	114
10.8 参考文献	114
第11章 冲击波吸收电容器	116
11.1 引言	116
11.2 绝缘耐压强度	116
11.3 快波前冲击源	118
11.4 保护系统	119
11.5 用于断路器的电容器	123
11.6 结论	125
11.7 问题	125
11.8 参考文献	125
第12章 用于电动机的电容器	126
12.1 引言	126
12.2 无功需求	127
12.3 由电容器引起的其他效应	128
12.4 电容器额定值的选择	129
12.5 电动机起动及相关问题	133
12.6 问题	139
12.7 参考文献	140
第13章 各种用途的电容器	141
13.1 引言	141
13.2 电容器在电弧炉中的应用	141
13.3 电容器在点焊机中的应用	143
13.4 电容器在照明设备中的应用	144
13.5 电容器在单相电动机中的应用	146
13.6 电容器在铁磁谐振变压器中的应用	147
13.7 电容器在脉冲电源中的应用	148

13.8	电容器在超高压工程中的应用	151
13.9	电容器在能量储存中的应用	154
13.10	问题	155
13.11	参考文献	155
第 14 章	静止无功补偿器	157
14.1	引言	157
14.2	补偿的概念	157
14.3	并联补偿的作用	158
14.4	静止无功补偿器概述	159
14.5	静止无功补偿器中的损耗和谐波	164
14.6	大电网中静止无功补偿器的作用	166
14.7	结论	168
14.8	问题	169
14.9	参考文献	169
第 15 章	并联电容器的保护	171
15.1	引言	171
15.2	过电流保护	172
15.3	电容器支架故障的保护	172
15.4	不平衡保护	173
15.5	结论	180
15.6	问题	180
15.7	参考文献	181
第 16 章	过电流保护	182
16.1	引言	182
16.2	熔断保护的种类	182
16.3	电容器的熔断器	183
16.4	熔断器的选择	185
16.5	熔断器断开后的影响	192
16.6	结论	193
16.7	问题	194
16.8	参考文献	194
第 17 章	断路器	195
17.1	引言	195
17.2	断路器的种类	195
17.3	断路器的额定值	198

17.4 断路器的性能	202
17.5 用于电容器投切的断路器	204
17.6 结论	208
17.7 问题	209
17.8 参考文献	210
第 18 章 冲击波的保护	211
18.1 引言	211
18.2 雷电冲击	211
18.3 雷电冲击的种类	211
18.4 避雷器	214
18.5 避雷器的特性	217
18.6 暂时过电压的本质	221
18.7 保护配合	223
18.8 结论	228
18.9 问题	228
18.10 参考文献	229
第 19 章 维护和故障检修	230
19.1 引言	230
19.2 维护	230
19.3 故障检修	233
19.4 问题	241
19.5 参考文献	241
第 20 章 谐波的滤除	242
20.1 引言	242
20.2 谐波源	243
20.3 系统对谐波响应	245
20.4 可接受的性能指标	246
20.5 谐波滤波器	248
20.6 系统响应方面的考虑因素	249
20.7 滤波器设计	251
20.8 结论	256
20.9 问题	257
20.10 参考文献	257
第 21 章 电容器引起的变压器瞬态	259
21.1 引言	259

21.2 变压器与电容器一起投入系统	259
21.3 电容器投切引起的变压器瞬态	261
21.4 减小瞬态电压	263
21.5 结论	266
21.6 问题	266
21.7 参考文献	267
第 22 章 电容器的投切	268
22.1 引言	268
22.2 开关操作	268
22.3 可接受电压的标准	278
22.4 绝缘配合	279
22.5 结论	280
22.6 问题	280
22.7 参考文献	281
第 23 章 控制电缆中的感应电压	282
23.1 引言	282
23.2 感应电压的来源	282
23.3 可接受的感应电压	284
23.4 实例系统	285
23.5 感应电压的计算	285
23.6 雷电对控制电缆的作用	289
23.7 结论	292
23.8 问题	292
23.9 参考文献	292
第 24 章 经济分析	294
24.1 引言	294
24.2 工程经济学基础	294
24.3 成本分解	295
24.4 所得税和相关因素的影响	298
24.5 经济评估	301
24.6 结论	307
24.7 问题	308
24.8 参考文献	308
附录	309
附录 A 电容器电路基础	309

附录 B 断路器数据	313
附录 C 避雷器数据	319
附录 D 熔断器特性	323
参考文献	327

名词和术语的定义^①

有功功率 (Active power): 电路中电压与电流的同相位分量乘积, 也称实功率。

变速传动 (Adjustable speed drive, ASD): 可以方便地实现电动机调速的电气传动。

交流 (Alternating current, AC): 与直流相对应, 周期性地改变方向的电压或电流, 即正负值交替出现。

安培 (Ampere, A): 测量电流的单位, 指电子在导线中流动的速率, 1 安培是每秒有 6.023×10^{23} 个电子流动。

视在功率 (Apparent power): 是电压与电流的乘积。

背对背投切 (Back-to-back switching): 与一个或多个电容器组并联连接的某个电容器组的投切。

背景谐波 (Background harmonic): 某处的谐波电压畸变, 它不是由电压畸变水平引起的。^②

母线 (Bus): 一个或一组导体, 作为两个或多个回路的公共连接部分, 用于相同电压设备的相互连接。

电容 (Capacitance): 由导体和电介质组合所产生的特性, 当导体之间存在电位差时, 它以电荷的形式储存能量。

电容器 (Capacitor): 在电力系统中, 电容器用于提供无功功率。电力电容器由加有合适的绝缘浸渍液的纸或塑料绝缘体、作为隔层的金属箔板组成, 并封装在金属外壳内。

电容器控制器 (Capacitor controller): 用于自动投切并联电力电容器组的装置。

电容器充电涌流 (Capacitor inrush current): 在电容器组接通电源的初始阶段, 流过电容器的瞬态充电电流。

电容器熔断器 (Capacitor fuse): 电力电容器组中用于从电力系统中断开故障相的熔断器。

电容器放电涌流 (Capacitor outrush current): 一个或多个电容器对短路点的

① 这部分为原书的附录 B, 为方便读者阅读而提前到此。——译者注

② 这个定义可能有误。——译者注

高频、高幅值放电电流。例如对并联连接的故障电容器的放电，或对故障点附近断路器的放电。

特征谐波 (Characteristic harmonic): 谐波源中的主导性频率分量，例如 6 脉波变流器的特征谐波为 5、7、11、13、17、19 次等。

断路器 (Circuit breaker): 一种开关装置。正常电路条件下，用于关合、承载和开断电流；在诸如故障或短路的不正常电路条件下，在指定时间内用于关合和承载电流，然后切断电流。根据切断电流所采用的介质不同，分为油断路器、压缩空气断路器、气体或 SF₆ 断路器和真空断路器。

整流器 (Converter[⊖]): 将交流转变成直流的装置。

波峰因数 (Crest factor, C_f): 周期波形的峰值与其有效值之比。正弦波的波峰因数是 1.414；对于畸变波形，波峰因数是变化的。

电流互感器 (Current transformer): 用于检测高压电路中电流的装置，其应用目的是计量或控制。

阻尼 (Damping): 阻碍瞬态和谐波效应的电力系统特性。

三角形联结 (Delta connected): 三相变压器或三个单相变压器组成的三相变压器组绕组的一种连接方式，绕组之间串联连接，形成一个闭合路径。三角形联结也用于三相并联电抗器组、三相并联电容器组或三相发电机绕组。

位移功率因数 (Displacement power factor, DPF): 基波 (60 Hz) 电压和电流的有功功率与视在功率的比，不考虑谐波的影响。

畸变功率 (Distortion power): 视在功率中的谐波成分，对实际功率不产生影响。

滤波器 (Filter): 电气系统中，阻止某些频率分量，而让另一些频率分量通过的装置。

滤波用电容器 (Filter capacitors): 与电感器和 (或) 电阻器一起使用的电容器，用于控制电力系统中的谐波，例如减小由大型整流器负载或电弧炉引起的电压畸变。

固定电容器组 (Fixed capacitor bank): 接在电路中的电容器组，不具有任何自动控制装置。

频率 (Frequency): 周期性重复量的重复率，通常使用的单位是赫兹 (Hz)。在美国，交流电的标准频率是 60 Hz。

频率响应 (Frequency response): 描述电路或装置的阻抗随驱动频率变化的方程或曲线图。

⊖ 原文有误，Converter 指的是变流器，是整流器和逆变器的总称；但按后面的定义，这里的 Converter 实际上是整流器的意思。——译者注